

Pengaruh Sudut Kontak Statis terhadap Penyebaran *Droplet* di Atas Permukaan Padat yang Dipanaskan pada Bilangan Weber Menengah

M. Dyan Susila E.S.

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Lampung.

Telp. +6281 9793 7749. E-mail: dyan_susila@unila.ac.id

Abstract

The influence of static contact angle on the spreading of droplet on a heated solid surface has been studied experimentally. Static contact angle was important parameter which influenced the impact behavior and heat transfer during the interaction of droplet and solid surface. Droplet substance was destilated water with initial diameter of 2.5 mm and solid surface material was stainless steel. Impact energy was expressed in Weber number, they were 52.1 and 57.7. Solid surface temperature was varied from 60–285 °C to cover the heat transfer regimes, they were single-phase liquid, nucleate boiling, transition boiling, and film boiling. Static contact angle were 0°, 35.04°, and 85.72°.

As result, it was known that static contact angle has influence on spread characteristic after droplet impacting solid surface. Spreading factor increases due to the decrease of static contact angle. Evaporation time decreases due to the decrease of static contact angle.

Keywords: droplet, impact, spreading, static contact angle

1. Pendahuluan

Dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan padat yang dipanaskan merupakan suatu fenomena yang banyak menarik perhatian untuk diteliti. Salah satu hal penting adalah dinamika cairan yang terlihat setelah *droplet* menyentuh permukaan padat yang dipanaskan.

Penerapan tumbukan *droplet* dengan permukaan padat yang dipanaskan meliputi banyak hal di dalam bidang keteknikan. Dalam area *spray cooling*, *liquid droplet* biasanya digunakan untuk mendinginkan permukaan panas pada proses reaksi inti nuklir, pembentukan material, *quenching*, dan peralatan elektronik. Pada *internal combustion engine*, interaksi antara *droplet* bahan bakar dengan dinding ruang bakar merupakan hal yang mempengaruhi proses atomisasi dan pencampuran sebelum pembakaran.

Penelitian mengenai pengaruh sudut kontak *liquid-solid* pada *droplet* sudah pernah dilakukan sebelumnya. Qiao dan Chandra (1997) meneliti pengaruh sudut kontak dengan memberikan *surfactant* (zat untuk menurunkan tegangan permukaan) pada *liquid droplet* untuk mengontrol sudut kontak. Sudut kontak adalah

sudut yang dibentuk antara garis datar permukaan padat dengan garis singgung permukaan *droplet* yang melalui titik perpotongan permukaan padat dan permukaan *droplet*. Namun penelitian mereka memiliki kekurangan karena dengan menambahkan *surfactant* akan merubah sifat fisis *droplet* sehingga pengaruh yang lebih dominan tidak diketahui, apakah sudut kontak statis atau tegangan permukaan.

Miyauchi dkk (2002) melaporkan bahwa dengan memberikan radiasi sinar ultraviolet (UV) pada permukaan padat yang dilapisi dengan material TiO₂ akan menghasilkan sudut kontak yang mendekati 0° untuk interaksi antara air dengan permukaan TiO₂. Fenomena ini dapat digunakan untuk mengontrol sudut kontak air pada permukaan TiO₂ sehingga dapat menjadikan sudut kontak statis sebagai parameter utama dengan parameter yang lainnya konstan.

Penelitian mengenai tumbukan *droplet* dengan permukaan panas yang dilakukan sebelumnya banyak terkonsentrasi pada bilangan Weber rendah, sedangkan fenomena tumbukan *droplet* pada bilangan Weber menengah banyak diaplikasikan pada proses *spray cooling* maupun *spray combustion*.

Penelitian kali ini kami akan melakukan eksperimen mengenai dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan padat yang dipanaskan pada bilangan Weber menengah berdasarkan dari semua alasan yang kami ungkapkan di atas. Penelitian ini akan menggunakan permukaan TiO_2 dengan radiasi sinar ultraviolet (UV) sebagai pengontrol sudut kontak statis.

Chandra dan Avedisian (1991) meneliti pengaruh temperatur permukaan terhadap perubahan bentuk *droplet* selama proses tumbukan. Materi *droplet* yang digunakan adalah *n*-heptana, untuk permukaan padat digunakan stainless steel. Dari eksperimen ini, dapat dilaporkan bahwa *spread factor* (perbandingan diameter *liquid film* dengan diameter awal *droplet*) tidak dipengaruhi langsung oleh temperatur permukaan sesaat setelah tumbukan. Oleh karena itu, pengaruh tegangan permukaan dan viskositas dapat diabaikan dalam periode sesaat setelah tumbukan.

Takata (2002) meneliti mengenai pengaruh sudut kontak statis terhadap waktu evaporasi (*evaporation time*) dan *wetting limit temperatur*. Materi *droplet* yang diamati adalah air. Untuk merealisasikan sudut kontak sebagai parameter utama maka digunakan permukaan padat yang diberi beberapa variasi perlakuan dan ditambahkan radiasi sinar ultraviolet. Hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa *evaporation time* semakin pendek dengan menurunnya sudut kontak statis, hal ini dikarenakan bidang kontak antara *droplet* dengan permukaan padat saat bertumbukan bertambah luas dengan semakin kecilnya sudut kontak statis. Hasil lain yang dilaporkan bahwa semakin kecil sudut kontak maka *wetting limit temperatur* semakin tinggi. Dan hampir semua data untuk sudut kontak tidak dipengaruhi oleh diameter *droplet*, kecuali untuk sudut kontak 4° , di sini *wetting limit temperatur* dipengaruhi oleh diameter *droplet*.

Hidaka dkk (2006) melakukan penelitian mengenai pengaruh sudut kontak statis terhadap *evaporation time*, dan *wetting limit temperature*. Untuk mengontrol sudut kontak digunakan permukaan padat yang diberi beberapa jenis perlakuan permukaan sehingga diperoleh rentang sudut kontak antara 0°

sampai 170° . Mereka melaporkan bahwa *evaporation time* menurun dengan semakin kecilnya sudut kontak, alasannya karena perpindahan kalor meningkat dengan semakin luasnya bidang kontak antara *droplet* dengan permukaan panas akibat menurunnya sudut kontak.

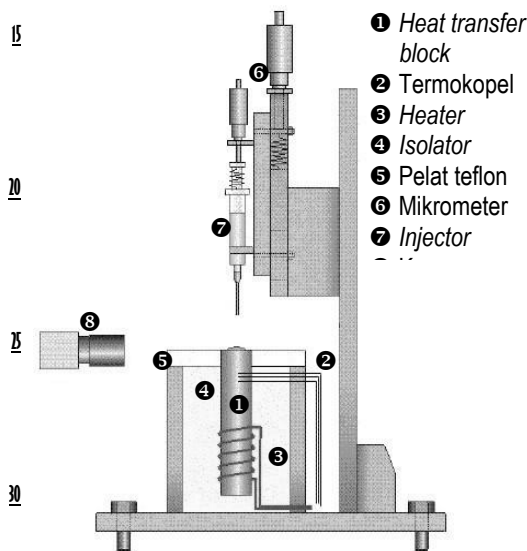
Deendarlianto dkk (2008) melakukan studi eksperimental mengenai pengaruh *surface wettability* pada dinamika tumbukan dan fenomena perpindahan kalor *droplet* yang menumbuk permukaan padat yang dipanaskan. Untuk mengontrol *wettability* digunakan dua permukaan stainless steel yang dilapisi dengan TiO_2 (titanium dioksida). Permukaan pertama diberi radiasi sinar ultraviolet untuk menghasilkan permukaan *hydrophilic*, sedangkan permukaan yang kedua tidak. Sebagai hasilnya, ditemukan bahwa *spreading ratio* meningkat dengan semakin kecilnya sudut kontak statis untuk temperatur permukaan di bawah titik didih air. Dan pada temperatur permukaan rendah, waktu evaporasi semakin cepat dengan semakin kecilnya sudut kontak statis.

Penelitian yang dilakukan sekarang memiliki kelebihan yaitu tidak merubah sifat fisis *droplet* untuk mengontrol sudut kontak statis tetapi menggunakan permukaan yang dilapisi TiO_2 sebagai pengontrol sudut kontak statis. Penggunaan lapisan TiO_2 tidak merubah karakteristik perpindahan kalor, dengan metode pelapisan *sputtering* ketebalan lapisan hanya 200 nm sehingga cukup tipis untuk mengabaikan *thermal resistance*-nya. Penelitian ini juga dilakukan pada bilangan Weber menengah, dimana fenomena tumbukan *droplet* pada daerah tersebut banyak diaplikasikan pada proses *spray cooling* maupun *spray combustion*.

2. Metode

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Permukaan yang dipanaskan dikontrol menggunakan pemanas (*heater*) yang ditempatkan pada bagian bawah *heat transfer block*, dimana di sekelilingnya diberi penyekat panas. Temperatur permukaan diukur menggunakan tiga buah termokopel yang ditanamkan pada *heat transfer block* dengan jarak 10, 15, dan 20

mm dari permukaan atas, kemudian dengan metode ekstrapolasi diperoleh temperatur pada permukaan atasnya. *Droplet* dijatuhkan ke permukaan yang dipanaskan dengan menggunakan jarum *injector*. Mikrometer digunakan untuk menjamin *droplet* yang dijatuhkan ukurannya sama. Diameter *droplet* tetap yaitu 2,5 mm. Ketinggian jatuh *droplet* antara permukaan yang dipanaskan dengan jarum *injector* divariasikan yaitu 76 dan 84 mm. Peralatan pada Gambar 1 juga digunakan untuk mengukur sudut kontak statis.



Gambar 1. Susunan alat uji.

Dinamika tumbukan *droplet* dan evaporasinya diamati menggunakan *high speed video camera* dengan kecepatan pengambilan gambarnya 500 frame per detik dan *shutter speed* 1/10000 detik. Temperatur permukaan divariasikan dengan menaikkan temperatur dari 60–285°C. Ketika temperatur permukaan rendah, waktu evaporasi *droplet* diukur dengan menggunakan *timer*. Dan ketika temperatur permukaan tinggi (lebih dari 140°C), dimana evaporasi terjadi sangat singkat maka pengukuran waktu evaporasi menggunakan perhitungan jumlah frame dari *high speed video camera*.

Untuk menguji pengaruh sudut kontak statis sebagai salah satu parameter, digunakan tiga jenis permukaan. Pertama adalah permukaan stainless steel normal. Kedua

adalah permukaan stainless steel yang lapisi TiO₂ melalui proses *sputtering*. Ketiga adalah permukaan stainless steel yang dilapisi TiO₂ dan diberi radiasi sinar ultraviolet.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondisi Penelitian

Fluida *droplet* yang digunakan pada penelitian ini adalah air. Adapun sifat fisis *droplet* tersebut selama pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

- Massa jenis (ρ) = 996 kg/m³
- Tegangan permukaan (σ) = $71,2 \times 10^{-3}$ N/m
- Diameter (D) = 2,5 mm

Variasi ketinggian jatuh *droplet* dari permukaan padat akan mengubah kecepatan *droplet* sesaat sebelum tumbukan, sehingga bila dinyatakan dalam bilangan Weber diperoleh variasi dengan nilai 52,1 dan 57,7. Nilai tersebut termasuk dalam kategori bilangan Weber menengah dimana batasannya adalah $30 < We < 80$.

Berdasarkan hasil pengukuran, besarnya sudut kontak statis masing-masing spesifikasi jenis permukaan ditampilkan pada Tabel 1. Dan untuk menyederhanakan pembahasan pada bab ini maka digunakan singkatan untuk masing-masing permukaan. Pertama yaitu permukaan stainless steel yang dilapisi dengan TiO₂ dan diberi radiasi sinar ultraviolet dinyatakan dengan UVW. Kedua yaitu permukaan stainless steel yang dilapisi dengan TiO₂ tanpa radiasi sinar ultraviolet dinyatakan dengan UVN. Terakhir yaitu permukaan stainless steel normal tanpa dilapisi TiO₂ dinyatakan dengan NS.

Tabel 1. Spesifikasi jenis permukaan yang digunakan dan sudut kontak statis berdasarkan *sessile drop test*.

Jenis permukaan		
UVW	UVN	NS
$\theta \approx 0^\circ$	$\theta = 35,04^\circ$	$\theta = 85,72^\circ$

3.2 Pengamatan Dinamika Tumbukan Droplet secara Visual

Gambar 2 menunjukkan dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan panas UVW, UVN, dan NS terhadap waktu pada temperatur permukaan 60°C, keadaan ini merepresentasikan perilaku *droplet* pada temperatur di bawah titik didih air. Secara umum dari gambar tersebut dapat diamati bahwa perilaku *droplet* hampir sama yaitu menyebar (*spread*) secara radial setelah tumbukan dengan permukaan padat. Namun ditemukan adanya perbedaan tumbukan pada NS jika dibandingkan dengan tumbukan pada UVW dan UVN, yaitu struktur film *droplet* saat interaksi dengan permukaan panas.

Dinamika penyebaran *droplet* pada permukaan UVW dan UVN mempunyai *wetting area* yang lebih luas bila dibandingkan dengan permukaan NS, sehingga waktu untuk mencapai penyebaran maksimum lebih lama jika dibandingkan dengan permukaan NS. Pada permukaan UVW dan UVN penyebaran maksimum dicapai saat $t = 8$ ms, sedangkan pada permukaan NS saat $t = 4$ ms. Perbedaan luas *wetting area* tersebut dikarenakan permukaan UVW dan UVN mempunyai sifat afinitas yang tinggi terhadap air sehingga kemampuan *droplet* untuk membasahi permukaan (*wettability*) lebih tinggi dibandingkan dengan permukaan NS. Berdasarkan fakta tersebut, maka dapat dinyatakan bahwa semakin kecil sudut kontak statis maka *wetting area* setelah tumbukan semakin besar untuk temperatur permukaan di bawah titik didih.

Gambar dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan padat pada saat awal tumbukan ($t = 0$ ms) tampak posisinya sedikit berbeda. Hal ini dikarenakan untuk mendapatkan nilai bilangan Weber yang diinginkan harus menaikkan kecepatan jatuh *droplet* sesaat sebelum tumbukan sehingga gambar yang tertangkap kamera pada awal tumbukan sedikit berbeda akibat kecepatan jatuh *droplet* yang cukup cepat.

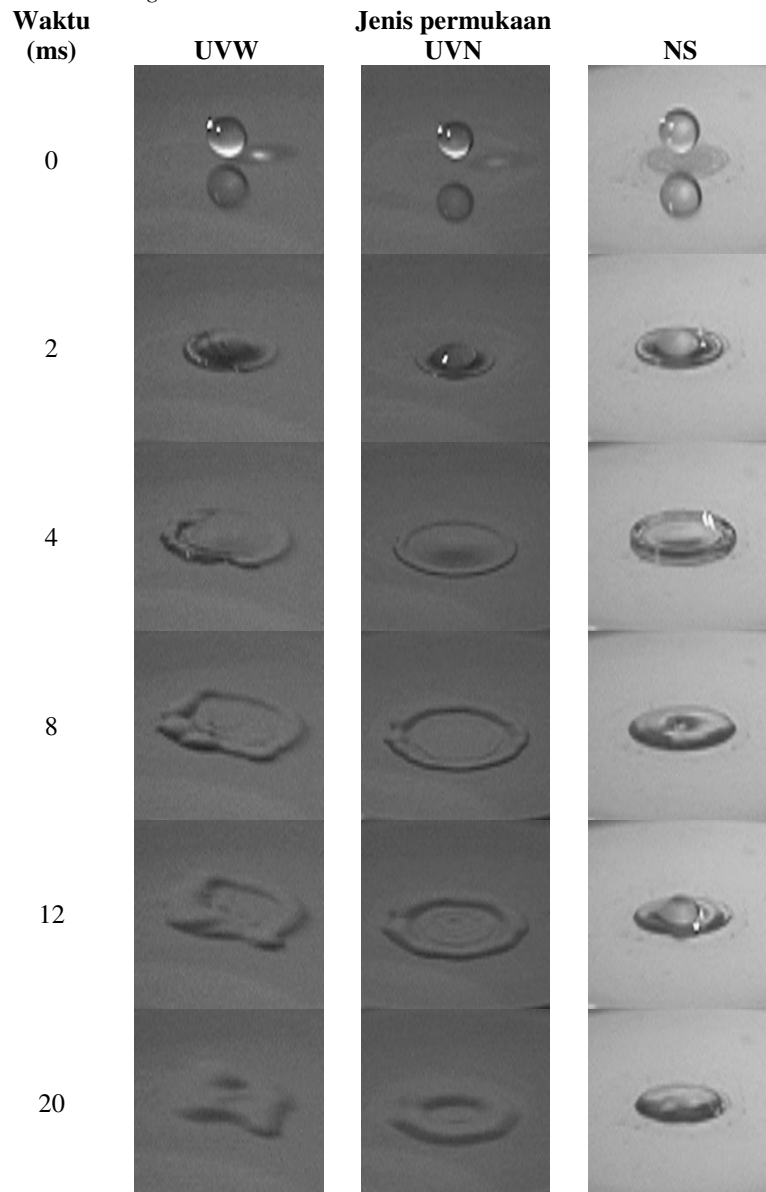
Gambar 3 menunjukkan dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan UVW, UVN, dan NS terhadap waktu pada temperatur permukaan 206°C, keadaan ini

merepresentasikan perilaku *droplet* pada temperatur di sekitar temperatur *wetting limit*. Temperatur *wetting limit* ditandai dengan akhir dari pendidihan nukleat. Menurut Takata (2002), jika temperatur permukaan melebihi temperatur *wetting limit* maka akan terbentuk *secondary droplet*, dan tidak ada kontak langsung antara *secondary droplet* dengan permukaan. *Secondary droplet* akan melayang-layang dan kemudian melambung dari permukaan.

Dari Gambar 3 dapat diamati bahwa perilaku tumbukan *droplet* di sekitar temperatur *wetting limit* berbeda jika dibandingkan dengan tumbukan *droplet* pada temperatur permukaan 60°C. Setelah tumbukan, *droplet* menyebar secara radial dan membentuk film tipis di atas permukaan padat. Temperatur permukaan yang cukup tinggi dapat untuk memulai proses pendidihan pada fase awal tumbukan dan diikuti dengan pembentukan uap yang hebat. Kemudian terbentuk *droplet* kecil dan melambung ke atas. Pada permukaan NS, *secondary droplet* mulai melambung dari permukaan pada $t = 20$ ms. Untuk itu dapat dikatakan bahwa temperatur permukaan lebih tinggi daripada temperatur *wetting limit* atau sudah berada pada area pendidihan transisi. Pada permukaan UVW dan UVN, tidak terlihat pembentukan *secondary droplet* sampai $t = 28$ ms setelah tumbukan dengan permukaan. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa temperatur permukaan lebih rendah daripada temperatur *wetting limit*.

Berdasarkan hasil di atas, maka dapat diambil beberapa informasi mengenai pengaruh sudut kontak statis terhadap dinamika tumbukan *droplet* di sekitar temperatur *wetting limit*. Pertama, bahwa semakin kecil sudut kontak statis maka lebih mampu mengantisipasi perubahan pola pendidihan dari pendidihan nukleat ke pendidihan transisi. Hal ini kemungkinan karena *liquid film* sangat tipis untuk sudut kontak statis yang kecil, sehingga transfer kalor lebih cepat dan evaporasi selesai dalam waktu yang singkat. Kedua, waktu kontak (*contact time*) antara *droplet* dengan permukaan UVW dan UVN lebih lama (lebih dari 20 ms). Ini berarti bahwa semakin kecil sudut kontak statis akan meningkatkan waktu kontak permukaan dengan *droplet* pada

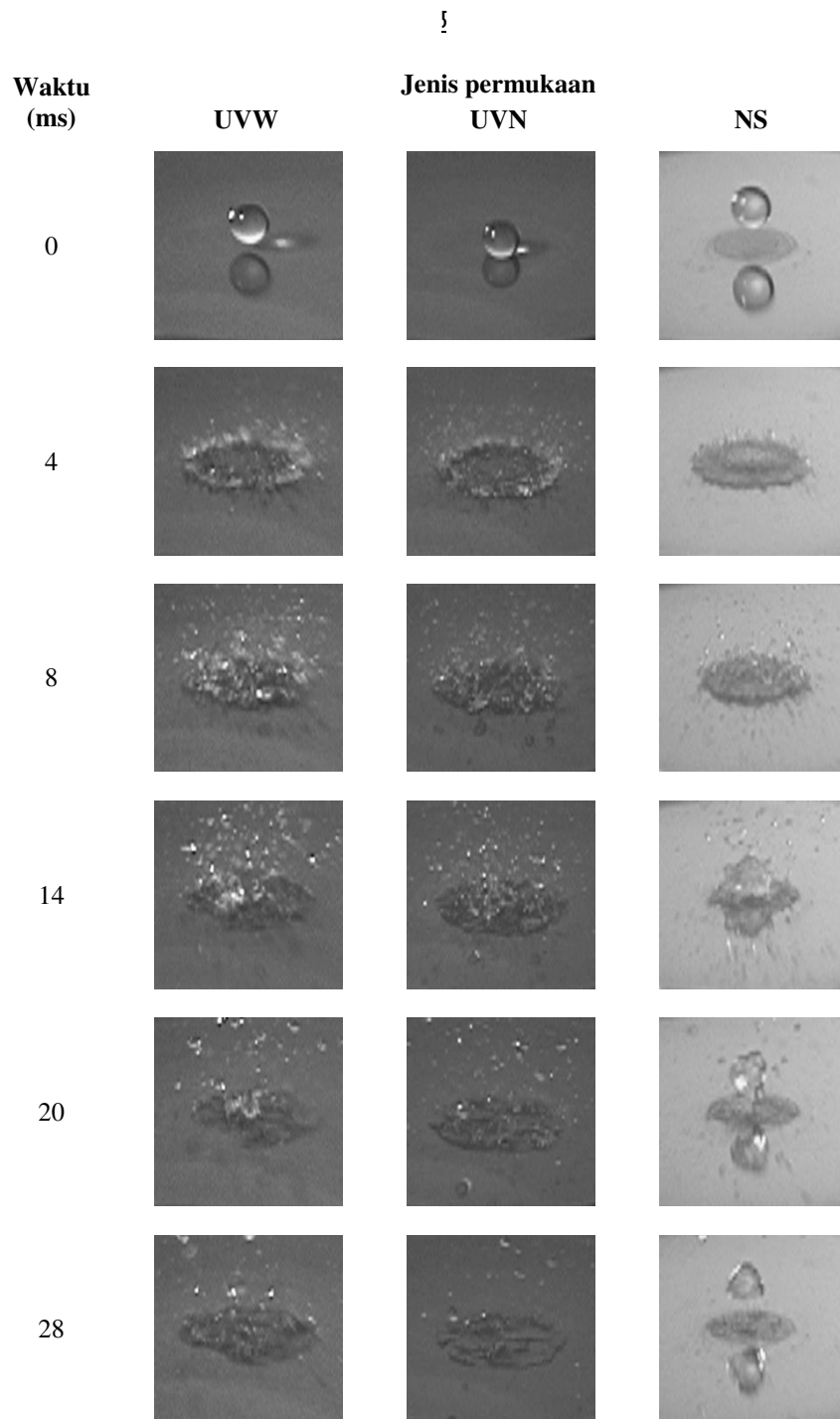
temperatur di sekitar *wetting limit*.



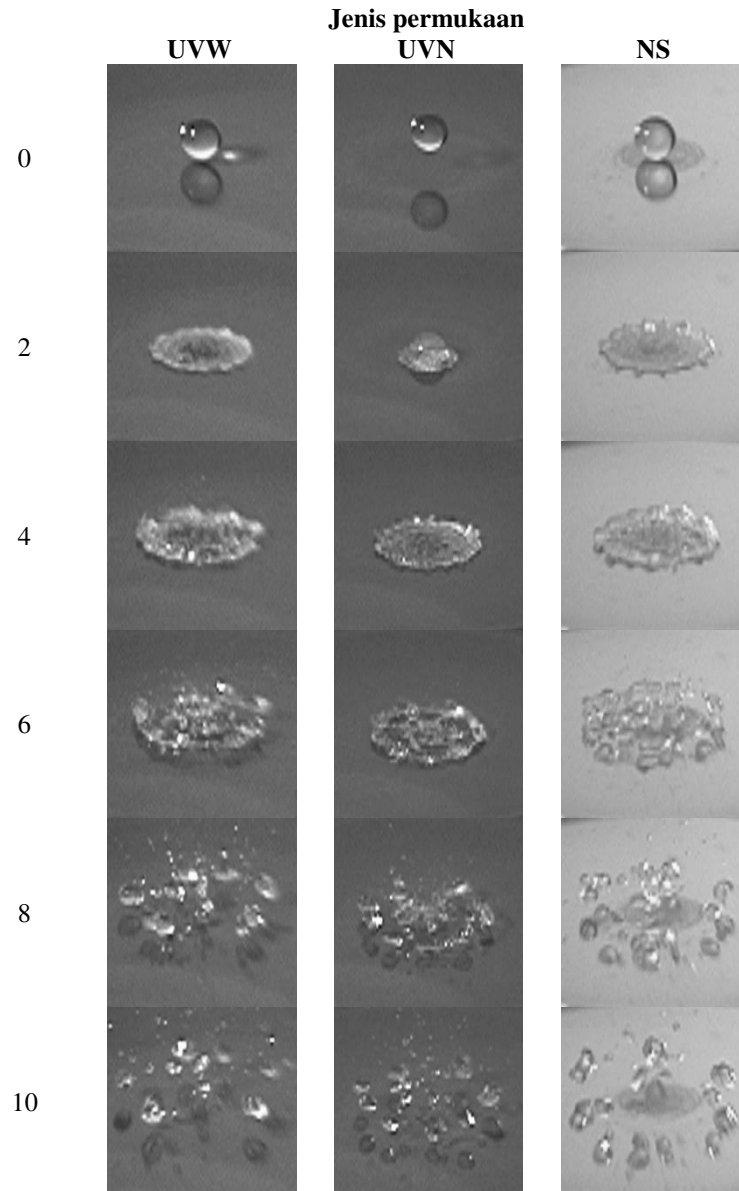
Gambar 2. Dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan UVW, UVN, dan NS pada $We= 52,1$ dan $T_s= 60^\circ C$.

Gambar 4 menunjukkan dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan UVW, UVN, dan NS terhadap waktu pada temperatur permukaan $285^\circ C$, keadaan ini merepresentasikan perilaku *droplet* pada area pendidihan film.

Dari gambar-gambar tersebut dapat diamati bahwa dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan UVW, UVN, dan NS memiliki kemiripan.



Gambar 3. Dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan UVW, UVN, dan NS pada $We = 52,1$ dan $T_s = 206^\circ\text{C}$.



§ Gambar 4. Dinamika tumbukan *droplet* dengan permukaan UVW, UVN, dan NS pada $We=52,1$ dan $T_s=285^\circ\text{C}$.

3.3 Pengaruh Sudut Kontak Statis terhadap Spreading Factor

Gambar 5 memperlihatkan pengaruh sudut kontak statis terhadap *spreading factor*, sebagai contoh adalah pada bilangan Weber 57,7. *Spreading factor* $\beta(t) = d(t)/D$ diplot terhadap waktu tak berdimensi ($\tau = tu/D$). Pada temperatur permukaan 60, 99, 138, dan 197°C ,

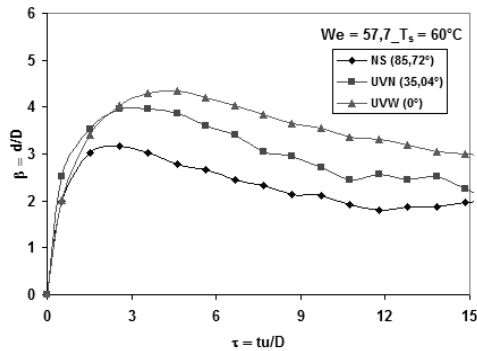
§ lihat Gambar 5(a), (b), (c), dan (d), jelas bahwa semakin kecil sudut kontak statis maka *spreading factor* akan meningkat. Hal tersebut dikarenakan permukaan yang dilapisi dengan TiO_2 mempunyai afinitas yang tinggi terhadap air sehingga kemampuannya menyerap air ke permukaan meningkat.

Pada permukaan UVW dan UVN ($T_s =$

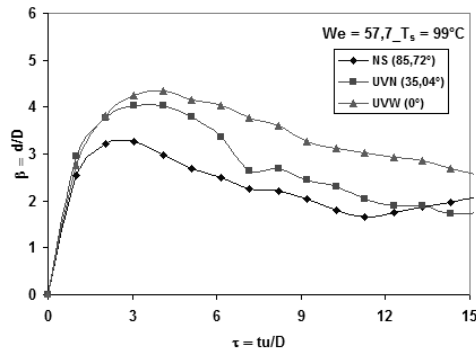
197°C), lihat Gambar 5(d), *droplet* menyebar hingga mencapai diameter *spreading* maksimum kemudian cenderung konstan. Mekanisme yang terjadi adalah interaksi *droplet* dengan permukaan UVW dan UVN memerlukan waktu yang lebih panjang untuk mencapai *spreading* maksimum dibandingkan permukaan NS, kemudian sebelum film *liquid* menciut telah disusul oleh pembentukan

banyak gelembung uap sehingga area kontak *liquid* dengan permukaan cenderung konstan.

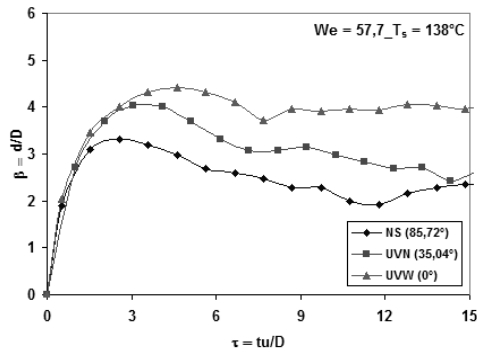
Pengaruh sudut kontak statis terhadap *spreading factor* pada temperatur permukaan 236 dan 285°C tidak begitu signifikan setelah *droplet* menumbuk permukaan panas, dapat dilihat pada Gambar 5(e) dan (f).



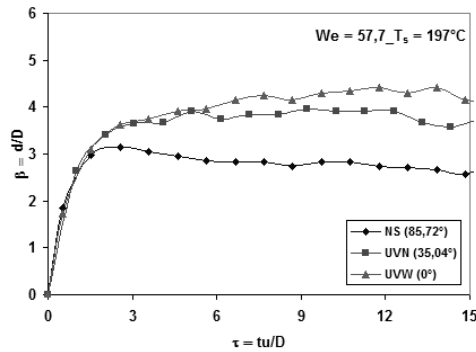
(a) $T_s = 60^\circ\text{C}$



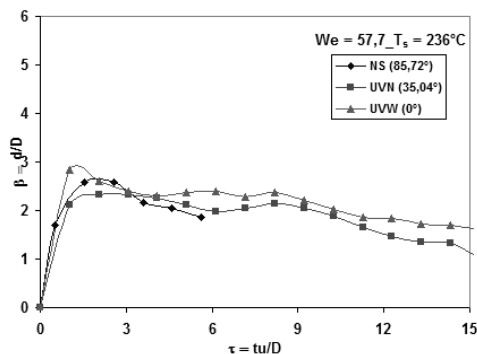
(b) $T_s = 99^\circ\text{C}$



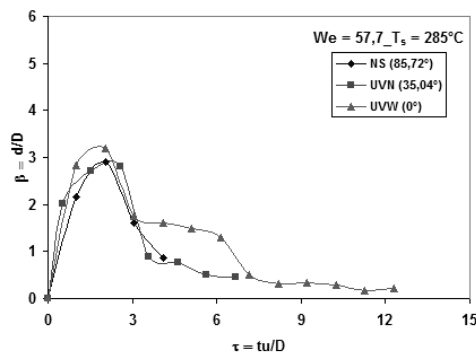
(c) $T_s = 138^\circ\text{C}$



(d) $T_s = 197^\circ\text{C}$



(e) $T_s = 236^\circ\text{C}$



(f) $T_s = 285^\circ\text{C}$

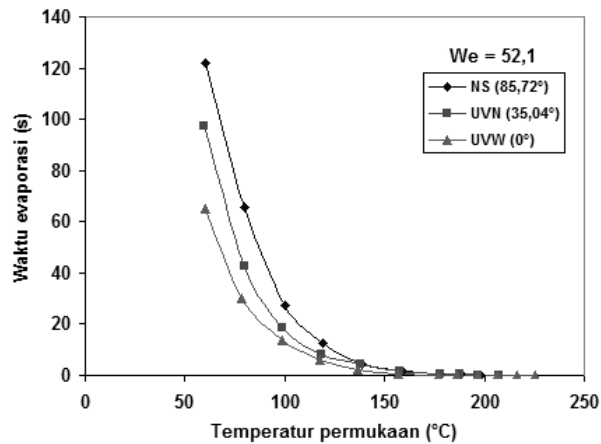
Gambar 5. Pengaruh sudut kontak statis terhadap *spreading factor* pada $We = 57,7$.

3.4 Pengaruh Sudut Kontak Statis terhadap Waktu Evaporasi

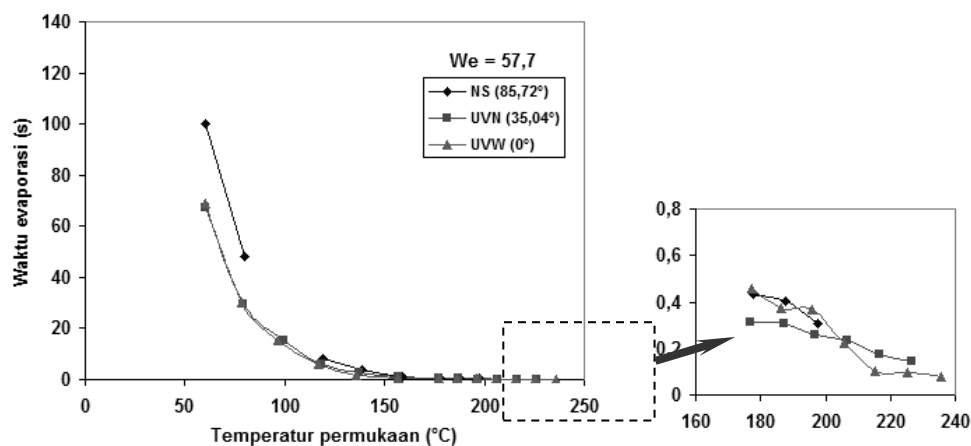
Gambar 6(a) dan (b) menunjukkan pengaruh sudut kontak statis terhadap waktu evaporasi untuk bilangan Weber 52,1 dan 57,7. Waktu evaporasi diplot terhadap temperatur permukaan dengan sudut kontak statis sebagai parameter.

Dari grafik tersebut, diketahui bahwa sudut kontak statis memiliki pengaruh terhadap waktu evaporasi. Waktu evaporasi semakin menurun dengan makin kecilnya sudut kontak statis.

Pada $We = 52,1$ ($T_s = 60^\circ\text{C}$), untuk permukaan UVW waktu evaporasi lebih cepat 57,09 s bila dibandingkan dengan permukaan NS, dan pada $We = 57,7$ ($T_s = 60^\circ\text{C}$) untuk permukaan UVW waktu evaporasi lebih cepat 30,99 s bila dibandingkan dengan permukaan NS. Hal ini dikarenakan semakin kecil sudut kontak statis maka diameter film *liquid* yang kontak dengan permukaan semakin besar. Akibatnya perpindahan kalor ke film *liquid* meningkat dan waktu evaporasi menjadi lebih singkat.



(a) $We = 52,1$



(b) $We = 57,7$

Gambar 6. Pengaruh sudut kontak statis terhadap waktu evaporasi.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sudut kontak statis mempengaruhi karakteristik tumbukan *droplet*.
2. Dengan semakin kecil sudut kontak statis maka luas *spreading* setelah tumbukan semakin besar.
3. Waktu evaporasi dipengaruhi oleh sudut kontak statis. Pada temperatur rendah, waktu evaporasi makin singkat dengan menurunnya sudut kontak statis. Sementara pada temperatur tinggi pengaruhnya tidak signifikan.

Daftar Pustaka

- [1] Chandra, S., Avedisian, C.T., 1991, "On the Collision of a Droplet with a Solid Surface", *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 432, pp. 13–41.
- [2] Deendarlianto, Takata, Y., Hidaka, S., Kohno, M., 2008, "The Effect of Contact Angle on the Evaporation of Water Droplet on a Heated Solid Surface", *HEAT 2008 Fifth International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems*.
- [3] Hidaka, S., Yamashita, A., Takata, Y., 2006, "Effect of Contact Angle on Wetting Limit Temperature", *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 35, pp. 513–526.
- [4] Miyauchi, M., Keida, N., Hishita, S., Mitsuhashi, T., Nakajima, A., Watanabe, T., Hashimoto, K., 2002, "Reversible Wettability Control of TiO₂ Surface by Light Irradiation", *Surface Science*, Vol. 511, pp. 401–407.
- [5] Takata, Y., 2002, "Photo-induced Hydrophilicity and Its Applications to Phase Change Phenomena", *Thermal Science & Engineering*, Vol. 10, pp. 31–37.
- [6] Qiao, Y.M., Chandra, S., 1997, "Experiments on Adding a Surfactant to Water Drops Boiling on a Hot Surface", *Proceeding Royal Society London A*, Vol.